

UNIVERSAL SIMULATION MODEL OF CRUISE AND FERRY SHIPS FLOW TO A SEA PASSENGER PORT

M. R. Yazvenko

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

This research focuses on developing a simulation model to determine an optimal method for distributing the incoming flow of cruise and ferry vessels within a passenger seaport or terminal system. The study presents a new software tool that, based on flexible interface configuration, can be applied to various maritime passenger terminals with multi-scenario modeling capabilities, aimed at refining the technological design methods of maritime passenger ports and terminals. It is noted that deterministic models used to calculate berth capacity or the required number of berths do not fully account for the dynamic parameters of the external environment, which limits their applicability and necessitates the use of simulation methods. The research highlights that, alongside the main parameters of expected annual passenger traffic and the number of cruise ships, the structure of the vessel flow is a key issue. The article proposes a model for prioritizing service to incoming cruise ships and ferry boats and considers the possibility of analyzing random flows of ships entering ports with both low and high priority applications in queues. Based on the implementation of multi-scenario simulation in a developed digital twin using new software, it has been possible to generate a large dataset for subsequent decision-making under uncertainty regarding the strategic development of maritime passenger ports in the sea region and methods for attracting new cruise lines.

Key words: transport processes, priority queue, queuing system, multi-priority queue, mathematical modeling, sea passenger port, decision-making.

For citation:

Yazvenko, Maksim R. "Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.

УДК 656.021.2, 65.012.1, 656.072

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА ЗАХОДОВ КРУИЗНЫХ И ПАРОМНЫХ СУДОВ В МОРСКОЙ ПАССАЖИРСКИЙ ПОРТ

М. Р. Язвенко

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является вопрос разработки имитационной модели для определения рационального варианта распределения входящего потока круизных и паромных судов в системе причалов морского пассажирского порта или терминала. Разработка в данном исследовании нового программного инструментария, который на основе гибкости настройки интерфейса может быть применим к различным морским пассажирским терминалам с учетом возможности выполнения многосценарного моделирования, направлена на уточнение методов технологического проектирования морских пассажирских портов и терминалов. Отмечается, что используемые детерминированные модели для расчета пропускной способности причала или необходимого количества причалов не позволяют учитывать в полной мере динамические параметры влияния внешней среды, что ограничивает их применение и формирует необходимость использования методов имитационного моделирования. В исследовании отмечается, что наряду с основным параметром: ожидаемым годовым пассажиропотоком и количеством круизных и паромных судов, ключевым вопросом является структура потока судов. Предложена модель приоритизации обслуживания входящих круизных и паромных судов, рассматривается возможность исследования наличия случайного потока судов, заходящих в порты, имеющих как низкий, так и высокий приоритет заявок в очереди. На основе выполнения многосценарного моделирования в разработанном цифровом двойнике с использованием новой программы доказана возможность сформировать набор больших данных для последующего приня-

тия решений при неопределенности стратегического развития морского пассажирского порта в регионе моря и методам привлечения новых круизных линий.

Ключевые слова: транспортные процессы, приоритетная очередь, система массового обслуживания, разноприоритетная очередь, математическое моделирование, морской пассажирский порт, принятие решений.

Для цитирования:

Язвенко М. Р. Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт / М. Р. Язвенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364. — EDN FKUCBB.

Введение (Introduction)

В настоящее время для расчета пропускной способности одного причала и необходимого числа причалов при заданном грузообороте или требований пассажиропотока используются детерминированные модели, которые обладают достаточной простотой и наглядностью. Однако детерминированные модели не в полной мере отражают специфику процесса обработки круизных или паромных судов [1], [2]. В действительности, моменты прихода судов в морские пассажирские порты представляют собой нерегулярные потоки событий, в результате чего возникает область влияния случайных процессов. В сформированное расписание на период навигации вносятся правки и корректировки на основе влияния факторов внешней среды. Это объясняется следующими причинами:

1. Для круизных или паромных линий существует график прихода судов, который обусловлен интересами круизной компании, а также заинтересованностью со стороны пассажиров в посещении выбранного порта на маршруте. Как следствие, величины интервалов между приходами судов могут отличаться.

2. Время прихода круизного судна в морской пассажирский порт во многих случаях может отклоняться от расчетного по разным причинам, которые не предусматриваются графиком. К ним можно отнести метеорологические условия, задержку в порту, к примеру, из-за пассажира или инцидента, необходимость корректировки маршрута и ряд других причин, имеющих стохастический характер.

3. В связи с внешними факторами возможны варианты наложения графиков круизных компаний.

4. Для отдельных круизных и паромных линий величины интервалов между приходами судов могут отличаться друг от друга.

5. Ввиду тенденции к увеличению размеров круизных и паромных судов, исследованной в статьях [3]–[5], постепенное их увеличение в очереди судов формирует необходимость решения задач перезакрепления, выделения приоритетности причалов за новыми круизными судами. Кроме того, имеет место формирование задачи перед руководителем региона и порта либо необходимости выделения нового отдельного морского пассажирского терминала под крупные суда, либо модернизации выделенных причалов с сохранением старых. В связи с этим возможны ситуации, когда в одних случаях образуются очереди из судов, в других — может наблюдаться простаивание причалов. Таким образом, кроме детерминированных моделей необходимо использовать вероятностные модели, полученные на основе теории массового обслуживания, имитационного моделирования, а также формировать условия и гипотезы для многосценарного моделирования в целях формирования полной группы возможных вариантов входных потоков круизных и паромных судов.

В работах [6]–[8] на основе выполненного ретроспективного анализа детально выделены отдельные стадии развития Пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» (далее — Пассажирский порт «Морской фасад») и представлено решение задачи модернизации причалов для возможности принимать большие круизные суда. Для увеличения длины круизных судов необходимо было увеличить причалы для швартовки судов длиной 333 м¹.

¹ Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». Инвестиционные проекты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.portspb.ru/O_porte/about/invest_programm (дата обращения 20.01.2022).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим ситуацию модернизации причалов Пассажи́рского порта «Морской фасад». Реализация инфраструктурного проекта предусматривала реконструкцию причала № 7 путем возведения трех выносных швартовных палов с соединительными мостиками и увеличение длины причалов № 6 и 7 (причального фронта) на 108,6 м. Данное изменение с учетом выполненного ретроспективного анализа представлено на рис. 1.

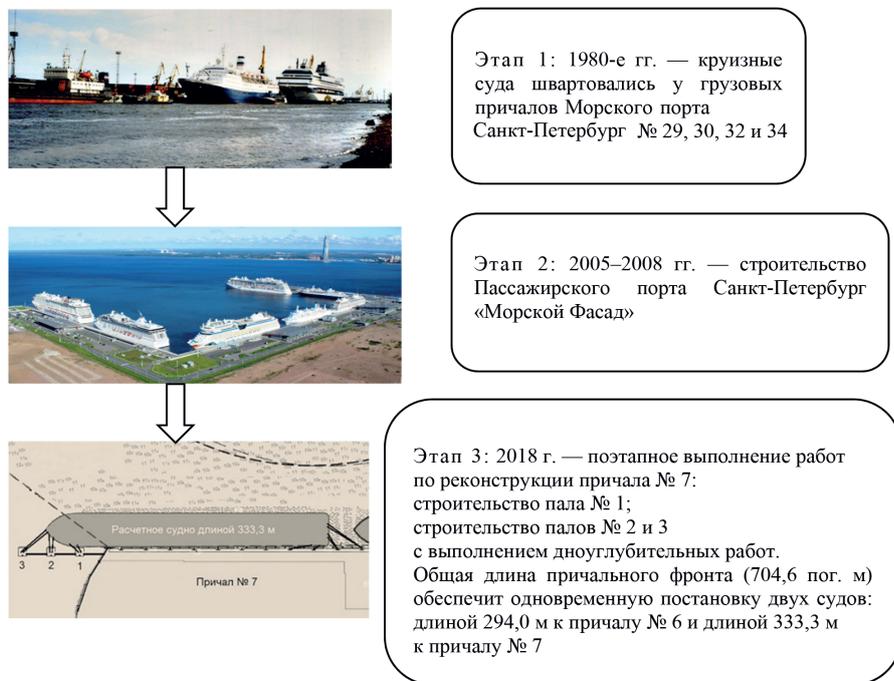


Рис. 1. Этапы развития Пассажи́рского порта «Морской фасад» с выделением необходимости модернизации причалов под влиянием тенденции к увеличению размеров круизных судов

К другим особенностям, которые необходимо принимать во внимание, относят то, что постоянные величины, установленные в нормативах проектирования портов, не позволяют учитывать особенности конкретного направления или города размещения пассажирского порта либо терминала. Например, в «Нормах технологического проектирования морских портов» продолжительность стоянки судов равна 1 ч для конечных портов и 0,5 — для промежуточных. Однако в г. Санкт-Петербурге установлено безвизовое пребывание иностранцев в туристических целях до 72 ч, что сказывается на среднем времени стоянки судов², указанном в работах [9], [10]. Подобные особенности невозможно отобразить существующими в нормативном документе константами. Подобного рода неточности в расчетах могут сказываться на качестве оказываемых услуг и повышении финансово-экономических рисков для порта в будущем.

Современная ситуация в сфере морских пассажирских перевозок, в отношении восстановления и развития новых маршрутных сетей характеризуется большим влиянием внешних факторов, которые ставят перед руководителями портов и терминалов задачу принятия решений при неопределенности [11]. Для реализации данной задачи необходимо наличие больших данных, которые можно получить только на основе множественного анализа различных сценариев развития, набора вариантов интенсивностей судозаходов и включения вероятностных моделей в процесс анализа.

В данной работе выполнено сравнение аналитического подхода для определения пропускной способности морского пассажирского порта с новой имитационной моделью порта на примере Пассажи́рского порта «Морской фасад».

² Пассажи́рский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». Инвестиционные проекты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.portspb.ru/O_porte/about/invest_programm (дата обращения 20.01.2022).

Целью исследования является разработка новой имитационной модели порта и программы ЭВМ (модели мезоскопического уровня транспортного планирования, так как рассматривается система причалов), а также некоторого унифицированного программного инструмента для генерации потока судов по заданному вероятностному закону, способного анализировать работу порта при одновременном приеме судов как на основе расписания судозаходов навигации, так и при учете возможного сценария случайного незапланированного потока судов для сведения к минимуму возможных нарушений при обслуживании заранее согласованных судов в расписании.

Потоки круизных и паромных судов, а также транспортные и пассажирские потоки являются ключевым элементом для исследования работы морского пассажирского порта. Наличие данных элементов является необходимым условием его непрерывной деятельности. Исследование потоков и разработка их математических моделей могут существенно повысить эффективность управления пассажирским портом и его ресурсами как на стратегическом, так и на оперативном уровне. Согласно открытым аналитическим данным агентства Cruisemarketwatch³, по всем регионам морей сохраняется тенденция как к увеличению пассажиропотока и развитию маршрутных сетей круизных линий, так и к увеличению количества крупных круизных и паромных судов (рис. 2).

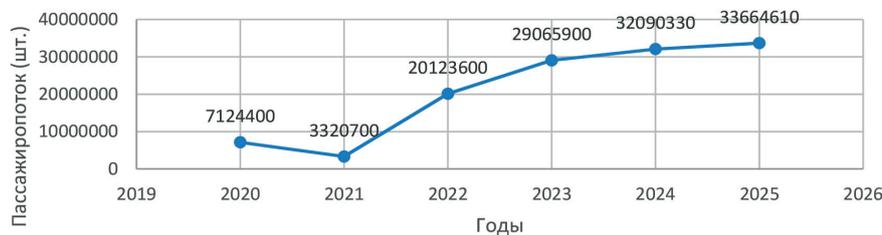


Рис. 2. Аналитические данные по восстановлению отрасли и пассажиропотоков морских паромных и круизных линий в 2020–2025 гг.

Одними из новых круизных судов, которые вышли на маршруты в 2025 г., являются:

- круизный лайнер Mein Schiff Relax компании TUI Cruises вместимостью 4 000 пассажиров;
- круизный лайнер World America компании MSC Cruises вместимостью 5 400 пассажиров;
- круизный лайнер Star of the Seas компании Royal Caribbean вместимостью 5 610 пассажиров.

Представленные данные подтверждают сохраняющуюся тенденцию к строительству крупных круизных лайнеров, что формирует новые требования для портов и терминалов. Для Пассажирского порта «Морской фасад» интенсивность работы до 2019 г. представлена на рис. 3^{4,5}.

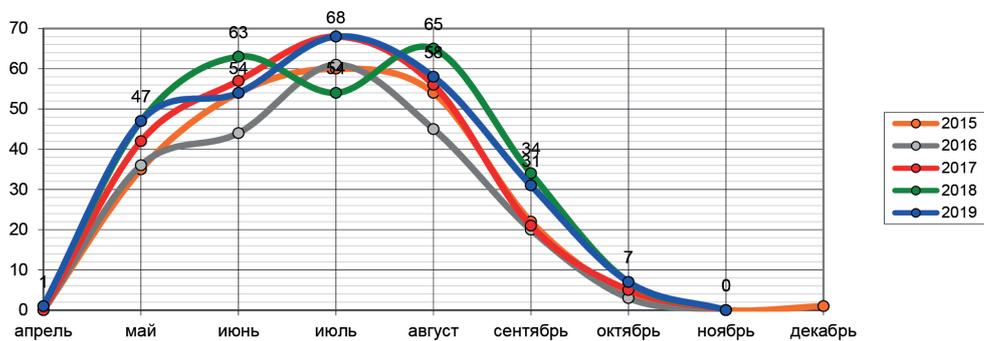


Рис. 3. Судозаходы по месяцам за 2015–2019 гг. для морского пассажирского порта «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург)

³ Cruise Market Watch. Growth of the Ocean Cruise Line Industry [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cruisemarketwatch.com/growth/> (дата обращения: 01.03.2025).

⁴ Статистика — Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.portspb.ru/O_porte/about/stat_new (Дата обращения: 01.03.2025).

⁵ Расписание — Пассажирский порт Санкт-Петербург «Морской фасад». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.portspb.ru/Raspisanie> (Дата обращения: 01.03.2025).

На рис. 4 показан график использования причалов № 1–7 Пассажи́рского порта «Морской фасад», на рис. 5 приведен результат анализа длины круизных и паромных судов для этого пассажирского порта.

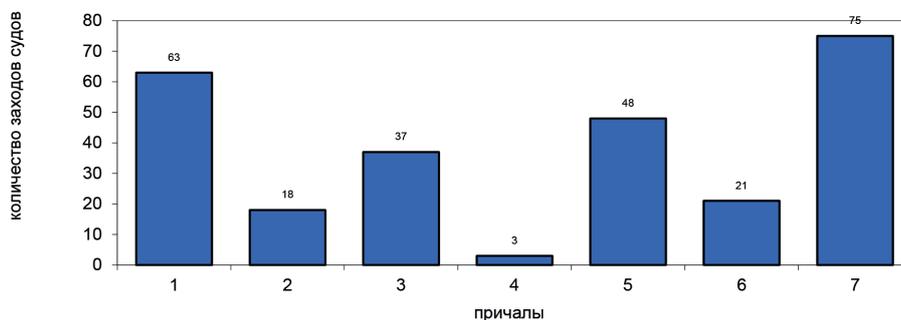


Рис. 4. Распределение прибытий круизных и паромных судов в Пассажи́рском порту «Морской фасад» (г. Санкт-Петербург)

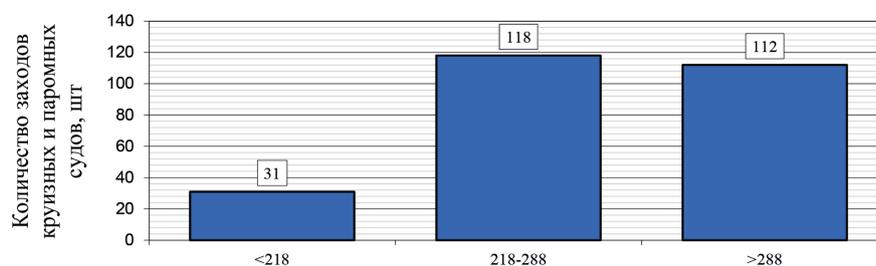


Рис. 5. Анализ длины круизных и паромных судов для Пассажи́рского «Морской фасад» за 2019 г. (г. Санкт-Петербург)

Современные методы проектирования морских пассажирских портов, расчеты основных параметров, потребности в причалах, оборудовании, а также требования к зданиям и сооружениям регламентированы действующими сводами правил^{6,7}, которые содержат теоретические расчетные величины для использования в процессе⁸ принятия проектных или операционных решений в работе порта. Состав флота судов оказывает большое влияние на технологические расчеты при проектировании порта. В сфере пассажирских перевозок суда могут значительно отличаться друг от друга по различным характеристикам, таким как длина, пассажироместимость, наличие отсеков для накатной техники (Ro-Ro) и т. д., которые необходимо учитывать при проектировании.

Рассмотрим следующий модельный сценарий класса систем массового обслуживания (СМО). Случайный характер прибытий судов в порт и случайность времени обслуживания судов, зашедших в порт вне расписания, вызывает разброс реальных результатов с математическим ожиданием. Различные отклонения от ожидаемых значений входного порта вызывают возможные потери морского порта в виде простоев, накопление очередей на обслуживание и связанных с этим экономических издержек. Проблема расчетов базовых параметров по нормативным документам рассматривается при использовании усредненных детерминированных величин, что не может в достаточной степени описать и учитывать стохастические процессы. При выполнении расчета определяется обобщенная величина, а именно суточная производительность при непрерывной работе на усредненное судно. Полученное значение используется для расчета требуемого числа при-

⁶ Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И. И. Грушко. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

⁷ Джейсуол Н. К. Очереди с приоритетами / Пер. с англ. И. С. Нефедовой, В. С. Манусевича. М.: Мир, 1973. — 280 с.

⁸ СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов» / Утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 1 марта 2018 г. № 75: дата введ. 2018–09–01, разработан ОАО «Созмортранспроект» и ЗАО «ЦНИИМФ». М.: Стандартинформ, 2018. IV, 217 с. Текст: непосредственный.

чалов. Таким образом, случайный характер используемых величин обуславливает возможные отклонения реальных результирующих значений от среднего, даже если последнее по набору уравнений рассчитано верно. Рассмотрим модель приоритизации обслуживания заходящих паромных и круизных судов (рис. 6).

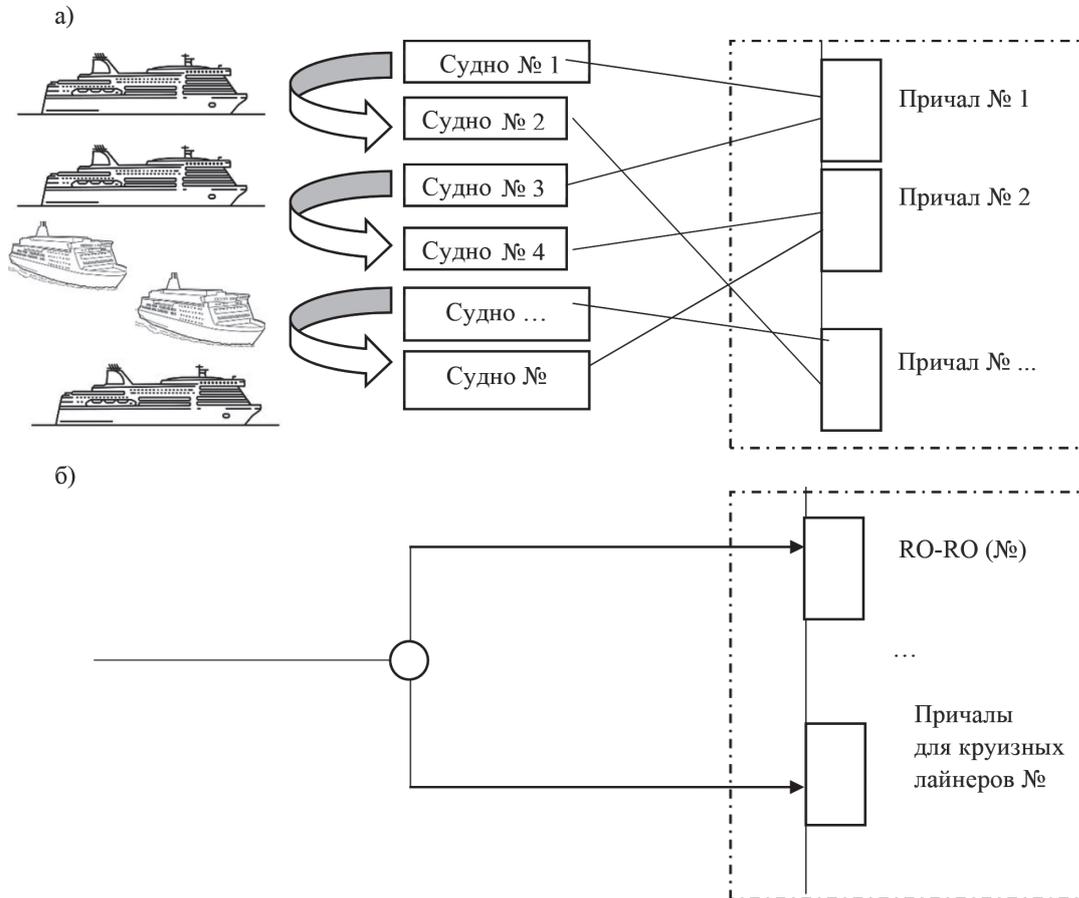


Рис. 6. Модель приоритизации обслуживания входящих паромных и круизных судов в морской пассажирский порт:

а — общая модель входного потока судов; б — модель приоритизации с выделением причалов

К параметрическим факторам относится в первую очередь приоритизация договорных отношений между участниками портовой деятельности, а также стохастические вмешательства внешней среды. Кроме того, на рис. 6 представлена модель, когда поток судов разделяется с учетом специализации причалов. Для решения данной задачи в Пассажирском порту «Морской фасад» с целью установления круглогодичного паромного сообщения с возможностью использования инфраструктуры морского терминала и пункта пропуска для осуществления операций, связанных с приемом грузовых автотранспортных средств, перемещаемых паромными, была выполнена реконструкция пункта пропуска для приема паромных и круизных судов.

В данном исследовании будет производиться моделирование потока судов, заходящих в морской пассажирский порт. В качестве модели будут использоваться параметры инфраструктуры и сведения о реальном входном потоке Пассажирского порта «Морской фасад». В данный порт суда могут заходить как по расписанию, так и случайным образом. Расписание составляется перед началом навигации на весь ее период. Судовладельцы гарантируют, что их судно прибудет в порт в назначенный срок, а пассажирский порт, в свою очередь, гарантирует возможность принять данное судно без задержек. При этом сохраняется возможность для других судовладельцев прибывать вне расписания, заранее подав запрос на швартовку. Такие суда могут быть приняты только в том случае, если это не мешает прибытию и обслуживанию судов, курсирующих по расписанию.

Суда, прибывающие в порт вне расписания, ограничены случайным временем между заходами. Согласно теории массового обслуживания, случайный поток заявок можно описать с помощью распределения Пуассона.

Пусть λ — среднее число заявок простейшего потока, которые поступают в систему в единицу времени. Пуассоновское распределение имеет следующую формулу:

$$F(t) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\lfloor t \rfloor} \frac{\lambda^i}{i!}, \quad t \geq 0. \quad (1)$$

Тогда вероятность появления k заявок простейшего потока за время t определяется по формуле Пуассона:

$$P_k(t) = \frac{\lambda^t e^{-\lambda}}{t!}, \quad t \in \{0, 1, \dots\}. \quad (2)$$

Рекомендации, указанные в «Нормах технологического проектирования морских портов» в части расчета пропускной способности морских пассажирских портов, принимающих круизные международные рейсы, ограничиваются следующим нормативом пропускной способности (табл. 1).

Таблица 1

Расчет пропускной способности причала

Вид круизного рейса	Норматив месячной пропускной способности одного причала при круизно-экскурсионной форме организации пассажирских перевозок, судозаход	
	Конечный пункт захода, город, имеющий туристическое значение	Прочие пункты
С российскими туристами	15	30
С иностранными туристами	12	20

Санкт-Петербург — город, имеющий туристическое значение, что подтверждает введенный 72-часовой безвизовый режим для иностранных туристов. Соответственно можно принять, что для морского порта, принимающего иностранные круизы в г. Санкт-Петербурге, норматив на каждый причал составляет 12 судозаходов в месяц. При таком нормативе время от одного судозахода до другого должно быть не более 60 ч (2,5 сут).

Проанализировать показатели работы порта на основе реальных данных и спрогнозировать работу при теоретическом максимуме можно с помощью математического и имитационного моделирования. Морской пассажирский порт можно представить для использования аппарата имитационного моделирования как СМО. В работах [1], [4], [6], [8], [10], [12] описаны примеры применения математического аппарата для моделирования работы порта и ответа на вопрос по прогнозированию его развития. Порт представляет собой многоканальную СМО. В состоянии системы S_0 все каналы обслуживания свободны. В состояниях S_k , где k от 1 до n , обслуживанием заявок заняты k каналов, но не все n каналов. Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно под воздействием входящего потока заявок, интенсивность которого равна λ . Отказ в обслуживании будет наступать в случае занятости всех каналов. Состояние системы обслуживания при неравномерном потоке описывается формулой Эрланга:

$$P_k = \frac{\frac{1}{K!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^K}{1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{1}{2!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n}, \quad (3)$$

где P_k — вероятности занятости k каналов обслуживания;
 P_0 — вероятность того, что все каналы будут свободны;
 P_n — вероятность того, что все каналы заняты.

Отказ наступает, когда заняты все n мест в системе, т. е. система находится в состоянии S_n :

$$P_{\text{отк}} = P_n.$$

Среднее количество занятых каналов определяется по следующей формуле:

$$\bar{n} = \sum p_k K. \quad (4)$$

Коэффициент загрузки каналов определяется по формуле

$$K_{\text{загр}} = \frac{\bar{n}}{n}. \quad (5)$$

Недостатком математического решения является то, что значение получается теоретическим, не принимающим во внимание колебания входного потока и скорости обслуживания. В таком случае необходимо использовать имитационное моделирование, многосценарное исследование в цифровом двойнике, выполненном в программной среде AnyLogic. Таким образом, система моделируется на среднем уровне абстракции, при котором не учитываются многие физические детали, например, скорость ветра или температура воздуха [12]. За счет этого данный вид моделирования позволяет имитировать функционирование крупных транспортных систем. Работу порта можно моделировать при помощи дискретно-событийного моделирования, при котором обслуживание судна в порту можно представить в виде последовательности четырех событий: прибытие судна, ожидание свободного причала, обслуживание (которое представляется как задержка во времени) и отправление судна.

В ходе исследования была разработана имитационная модель на примере Пассажирского порта «Морской фасад», позволяющая изучить работу конкретного морского пассажирского порта с одновременным приемом судов как по заранее составленному расписанию навигации, так и возможного случайного потока судов в порту.

Основа модели морского пассажирского порта реализована как СМО и описана в работах [12], [13]. Рассмотрим логику реализации модели. В имитационной модели⁹ реализована приоритетность обслуживания. Поток судов, прибывающих по расписанию, обладает абсолютным приоритетом в обслуживании и с причала его имеет любое другое судно, занимающее его в данный момент в модели. Таким образом, моделируется реальное требование принятия судов, не согласовавших заход до начала навигации. Помимо этого реализована приоритетность непосредственно в потоке случайно заходящих судов, которая описана в работах [13]–[15]. Время стоянки судов случайного потока соответствует распределению времени стоянки судов, прибывающих по расписанию, как и распределению судов по их размерам, что оказывает влияние на множество причалов, которые могут принять данные суда. Суды, курсирующие по расписанию, будут прибывать в полном соответствии с расписанием эталонного доступного года навигации 2019 г. для Пассажирского порта «Морской фасад».

Разработанная имитационная модель имеет трехмерную визуализацию для наглядности порядка приема судов, а также графики, отражающие основные показатели эффективности системы морского пассажирского порта (рис. 7). В двухмерном окне у каждого причала и судна визуально указываются их характеристики: для причалов — длина фронта, а для судов — их длина и особые отметки: является ли судно ролкером, принимаемым только на специализированных причалах, или судно принимается по расписанию.

⁹ Дискретно-событийное моделирование — инструмент имитационного моделирования AnyLogic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/discrete-event-simulation/> (Дата обращения: 01.03.2025)

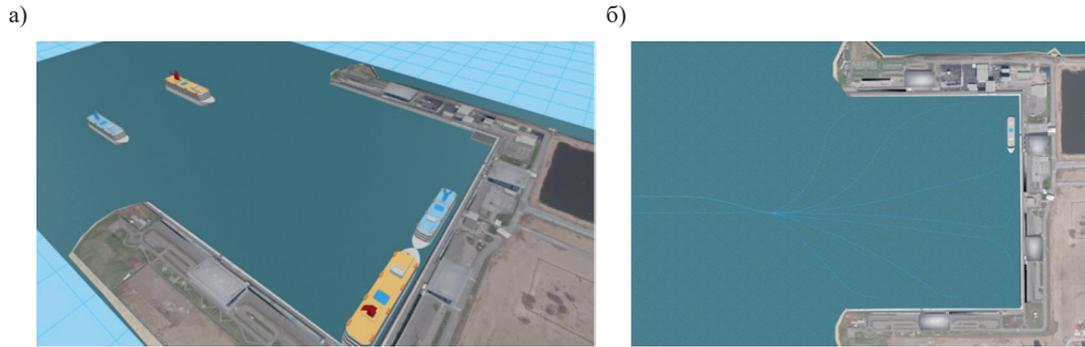


Рис. 7. Визуализация модели потока судов в имитационной модели морского пассажирского порта в Anylogic: а — 3D модель; б — выполнение учета размера круизного и паромного судна и выделение причалов

С помощью разработанной новой имитационной модели морского пассажирского порта и разработанной программы ЭВМ¹⁰ можно проводить как обыкновенные эксперименты (прогоны модель), которые продемонстрируют моделирование одного сезона навигации и определяют ключевые показатели работы порта, очереди и коэффициент загрузки причалов с помощью выполнения многосценарного моделирования, так и оптимизационные эксперименты, с помощью которых можно найти определенное значение интенсивности случайного входного потока для поиска определенной целевой функции при требуемых ограничениях.

Результаты (Results)

Проведем математическое моделирование пассажирского порта как семиканальной системы массового обслуживания по данным эталонной навигации 2019 г. За весь период навигации в количестве 177 дней порт посетило 265 судов со средним временем стоянки 1,36 сут. Используя норматив месячной пропускной способности по табл. 1, с учетом количества причалов и длительности навигации, можно определить, что порт теоретически может принять 495 судов в течение всей навигации при идеальных условиях. При математическом анализе порта как семиканальной СМО по формулам (3)–(5) получаются следующие вероятности занятости причалов и коэффициент загрузки морского пассажирского порта (табл. 2, рис. 8).

Таблица 2

Вероятности занятости причалов по данным 2019 г.

Вероятность занятости определенного числа причалов										
Интенсивность	Количество причалов								Коэффициент загрузки	
	0	1	2	3	4	5	6	7	\bar{n}	K
265	0,13	0,265	0,27	0,185	0,094	0,039	0,013	0,0038	2,04	0,291
495	0,023	0,088	0,167	0,213	0,203	0,155	0,098	0,054	3,61	0,516

На основе результатов табл. 2 видно, что в случае принятия портом случайного потока судов с интенсивностью, приближенной к нормативному значению, наиболее вероятное состояние системы сдвинется на 3–4 занятых причала с 1–2 при реальной интенсивности потока. В данном случае также возрастет до 5,4 % вероятность накопления очереди.

¹⁰ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660487 Российская Федерация. Программа для моделирования загруженности причалов морского пассажирского порта с учетом различных приоритетов круизных или паромных судов / М. Р. Язвенко; заяв. и патентообл. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; заявл. 07.05.2024; опубл. 07.05.2024. EDN DDLUCU.

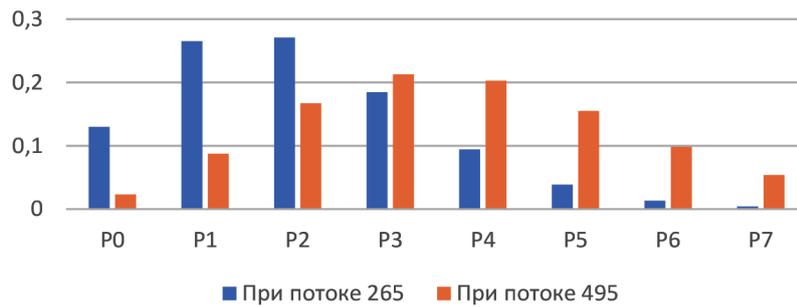


Рис. 8. Вероятности занятости причалов в течение 2019 г.

При моделировании ситуации с пиковой теоретической интенсивностью при случайном входном потоке данные имитационного моделирования приблизительно повторяют полученные математические вероятности до определенного момента, когда начинаются отклонения в сторону увеличения реальной нагрузки, как показано на рис. 9. Данные отклонения вызваны тем, что математический расчет принимает время обслуживания как описываемое нормальным распределением, которому в действительности время стоянки не соответствует.

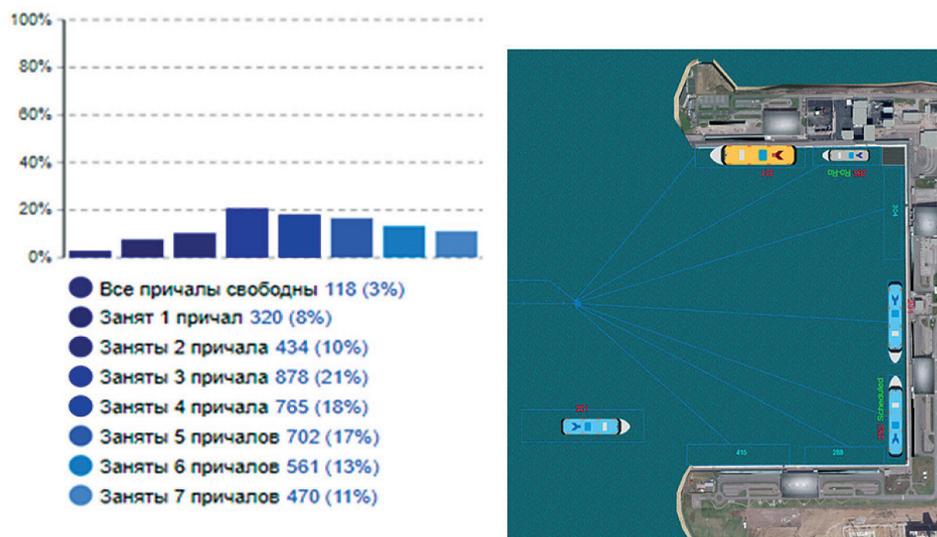


Рис. 9. Состояния системы морского пассажирского порта при моделировании случайного потока входящих паромных и круизных судов

При моделировании случайного потока судов с максимально допустимой по нормативу интенсивностью по результатам нескольких прогонов получены следующие усредненные результаты по основным показателям очереди (табл. 3).

Таблица 3

Результаты моделирования случайного потока при максимальной интенсивности

Интенсивность	Средняя длина очереди	Максимальная длина очереди	Среднее время в очереди, сут	Максимальное время в очереди, сут	Коэффициент загрузки порта
495	0,398	5,7	0,145	2,553	0,562

Видно, что при использовании максимально допустимой нормативом интенсивности входного потока происходит значительное накопление очереди, в некоторые моменты времени достигающее 2,553 сут. Это вызвано дифференциацией судов между собой: не все суда могут быть обслужены на всех причалах из-за ограничений в размерах [12]–[15] и распределения времени

обслуживания. Данные результаты моделирования случайного потока показывают, что использование нормативных значений значительно ограничено.

Рассмотрим моделирование реальных сценариев с известным расписанием и случайным потоком судов, поступающих одновременно. С помощью оптимизационного эксперимента в программной среде AnyLogic получим значение интенсивности случайного потока, при котором будут достигаться определенные показатели работы очереди. В качестве ограничений для данного эксперимента примем значения работы очереди из табл. 4. В качестве целевой функции будет выступать количество успешно обслуженных судов. В среднем через порт по результатам эксперимента проходит 433 судна. Полученное значение на 12,5 % ниже норматива. Средняя интенсивность случайного потока составила 28 судо-сут, или 165 судов за навигацию.

Полученные данные можно использовать для проведения моделирования работы морского пассажирского порта за навигацию с существующим расписанием и приемлемым случайным потоком. Усредненные значения на основе результатов серии выполнения имитационного моделирования представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования максимальной интенсивности при наличии расписания

Среднее количество пришедших судов случайного потока	Средняя длина очереди	Максимальная длина очереди	Среднее время в очереди, сут	Максимальное время в очереди, сут	Коэффициент загрузки порта
158,5	0,085	2,385	0,035	2,708	0,469

На рис. 10, а показана «оконная» форма графиков функции при моделировании по расписанию, полученных с помощью имитационной модели в среде AnyLogic.

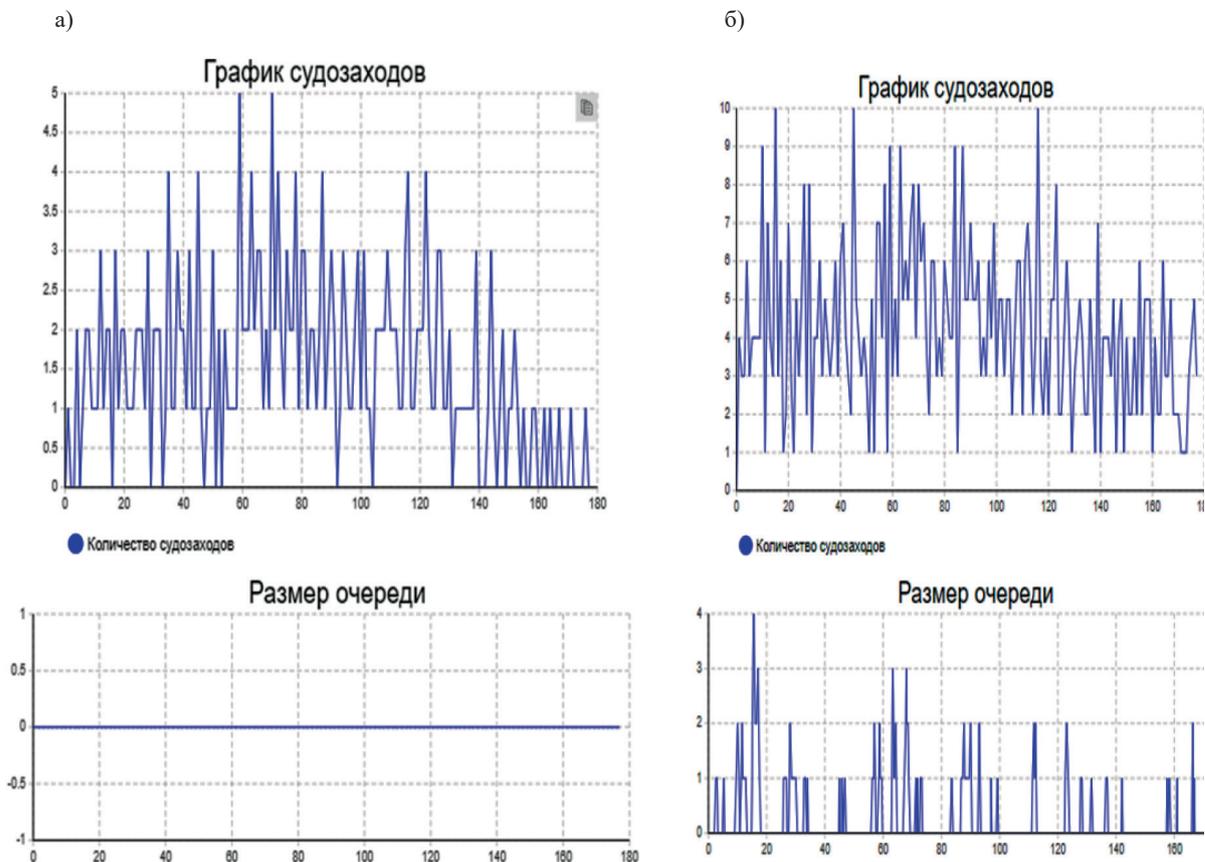


Рис. 10. Оконные формы результатов различных сценариев входного потока круизных и паромных судов: а — график судозаходов при моделировании движения только по расписанию; б — график судозаходов при моделировании движения с расписанием и случайным потоком

При условии добавления к расписанию случайного потока судов будут накапливаться очереди с периодичностью в несколько дней из этих же судов (рис. 10, б). При этом можно заметить, что при приеме максимально возможного случайного потока не наблюдалось ни одного случая, когда бы не прибыло ни одного судна.

Обсуждение (Discussion)

Для исследования морского пассажирского порта применимы модели СМО. В данном случае причалы и поступающие для обработки на них круизные и паромные суда образуют обобщенную СМО. Приход судна на терминал является заявкой, причал — каналом ее обслуживания. Однако необходимо принимать во внимание, что время обработки заявок в реальной системе не подчиняется закону Пуассона.

Сравнение данных имитационного моделирования с результатами аналитических расчетов обладают большей перспективностью для последующей обработки и формирования данных для систем принятия решений при неопределенности с поправкой на то, что аналитические расчеты принимали время обслуживания как распределенное по нормальному закону, показало, что результаты состояний системы в имитационной модели и вероятностей при расчетах оказались достаточно приближены друг к другу. При моделировании максимального случайного потока в некоторых случаях возникали задержки в обработке судов. При попытке достичь таких же показателей работы системы, как при максимальной интенсивности случайного потока, но при применении схемы обслуживания с расписанием и случайными заходами, произошло 15 %-е снижение допустимой интенсивности входного потока.

Близкое совпадение результатов имитационного моделирования случайного потока и аналитического расчета по нормативу и законам теории массового обслуживания показывает адекватность разработанной новой имитационной модели морского пассажирского порта. Полученная модель может использоваться для определения допустимого уровня интенсивности входного потока судов, выполнения многосценарного моделирования с учетом вероятностных процессов и формирования набора данных разброса значений, что позволяет руководителю порта перейти к системе принятия решений при неопределенности.

Заключение (Conclusion)

Активное влияние внешней среды, а также региональных факторов и трендов в сфере строительства новых круизных лайнеров и паромных судов формирует необходимость учета новых переменных, трансформирования принятия решений при неопределенности, что требует перехода от алгебраических моделей к имитационным.

В результате проведенного исследования выполнено следующее.

1. Разработана новая имитационная модель для оценки пропускной способности морского пассажирского порта, принимающего в модельных сценариях суда как по заранее составленному расписанию (известному на навигацию), так и при условии возникновения случайного потока судов, а также новая программа ЭВМ.
2. Представлена разработанная модель приоритизации обслуживания входящего потока паромных и круизных судов в морской пассажирский порт.
3. Представлены результаты исследования различных сценариев входного потока судов.
4. Приведены новые результаты определения состояния системы морского пассажирского порта при моделировании случайного потока входящих паромных и круизных судов.

Использование разработанного инструментария позволяет для лиц, принимающих решение, получить полную группу данных многосценарного моделирования: вероятности занятости определенного числа причалов, коэффициент загрузки причалов, среднюю длину очереди судов, максимальную длину очереди и др. На основе новой созданной имитационной модели появляется возможность исследовать систему морского пассажирского порта с абсолютным приоритетом, с относительным приоритетом, с ограниченным временем пребывания судна

в очереди, с ограничением по длине очереди и ряд других необходимых сценариев. Прогнозирование возможных колебаний судопотока, особенно в условиях влияния стохастических процессов, позволяет снизить неопределенность и заранее подготовиться к принятию соответствующих управленческих решений по модернизации инфраструктуры. Разработанная новая имитационная модель и разработанная программа ЭВМ для морского пассажирского порта позволяют увеличить возможности существующих моделей и методов, не выходя за пределы имеющегося опыта проектирования портов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майоров Н. Н.* Исследование вариантов обоснования модернизации инфраструктуры морского пассажирского порта для решения задачи прогнозирования его развития с учетом влияния внешней среды / Н. Н. Майоров, А. А. Добровольская // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 701–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712. — EDN ZASXYF.
2. *Ćorluka G.* Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective / G. Ćorluka, I. Peronja, D. Tubić // NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo. — 2020. — Vol. 67. — Is. 3. — Pp. 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1.
3. *Krile, S.* The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // Transport Problems. — 2020. — Vol. 15. — Is. 1. — Pp. 203–214. — DOI 10.21307/TP-2020-060.
4. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. DOI: 10.3390/su13073869.
5. *Майоров Н. Н.* Влияние основных трендов в сфере круизных и паромных перевозок на инфраструктуру морских пассажирских портов и терминалов / Н. Н. Майоров, А. А. Добровольская // Системный анализ и логистика. — 2022. — № 4(34). — С. 144–152. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-144-152. — EDN GCOVWE.
6. *Майоров Н. Н.* Исследование изменений и управление развитием морского пассажирского порта / Н. Н. Майоров // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 1(27). — С. 20–30. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-20-30. — EDN TAFFWT.
7. *Добровольская А. А.* Теория транспортных процессов и систем. Паромные маршруты и морские пассажирские порты / А. А. Добровольская, Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: СПб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2022. — 99 с. — EDN HRGLFO.
8. *Майоров Н. Н.* Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов: моногр. / Н. Н. Майоров. — СПб.: ГУАП, 2018. — 150 с.
9. *Язвенко М. Р.* Исследование загруженности причалов морского пассажирского порта на основе моделирования / М. Р. Язвенко // Системный анализ и логистика. — 2021. — № 2(28). — С. 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113. — EDN EJHUOQ.
10. *Кузнецов А. Л.* Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. — EDN TRJAZE.
11. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Academia, 2010. — 336 с.
12. *Майоров Н. Н.* Исследование операционных процессов обслуживания пассажиров в морском пассажирском терминале с использованием моделирования / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6(40). — С. 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80. — EDN XHLRJH.
13. *Майоров Н. Н.* Планирование работы морского пассажирского терминала на основе исследования интенсивностей заходов круизных судов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 3. — С. 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128. — EDN LMZQEO.
14. *Добровольская А. А.* Принятие решений при неопределенности по прогнозированию развития морского пассажирского порта на основе моделирования разных приоритетов заявок судов / А. А. Доб-

ровольская, Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сборник статей XXVI Международной научной конференции: в 3 ч. — Санкт-Петербург, 29 мая — 02 2023 года. — Ч. 3. — СПб.: СПб. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2023. — С. 107–112. — EDN PEZXTZ.

15. Майоров Н. Н. Исследование вариантов формирования данных на основе многосценарного моделирования по развитию морского пассажирского терминала для принятия решений при неопределенности / Н. Н. Майоров, М. Р. Язвенко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909. — EDN KNAWDQ.

REFERENCES

1. Maiorov, N. N. and A. A. Dobrovolskaya. “Research of the sea passenger port infrastructure modernization to solve the problem of forecasting development, taking into account the influence of the external environment.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 701–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-701-712.

2. Čorluka, G., I. Peronja and D. Tubić “Cruise port passenger flow analysis: A cruise port governance perspective.” *NAŠE MORE: znanstveni časopis za more i pomorstvo* 67.3 (2020): 181–191. DOI: 10.17818/NM/2020/3.1

3. Krile, S. and N. Maiorov “The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals.” *Transport Problems* 15.1 (2020): 203–214. DOI 10.21307/TP-2020-060.

4. Krile, S., N. Maiorov and V. Fetisov. “Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development.” *Sustainability* 13.7 (2021). DOI: 10.3390/su13073869.

5. Mayorov, N. N. and A. A. Dobrovolskaya. “Influence of main trends in cruise and ferry transportation on the infrastructure of sea passenger ports and terminals.” *System Analysis And Logistics* 4(34) (2022): 144–152. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-144-152.

6. Maiorov, N. N. “Research of change and management of sea passenger port development.” *System Analysis And Logistics* 1(27) (2021): 20–30. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-20-30.

7. Dobrovolskaya, A. A., N. N. Mayorov and V. A. Fetisov. *Teoriya transportnykh protsessov i sistem. Paromnye marshruty i morskije passazhirskie porty* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2022: 99.

8. Maiorov N. N. *Prognozirovanie razvitiya morskikh passazhirskih terminalov*. SPb.: SUAI, 2018.

9. Yazvenko, M. R. “Research of berths utilization at sea passenger port on the basis of modeling.” *System Analysis And Logistics* 2(28) (2021): 104–113. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-2-104-113.

10. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. “Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

11. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vychor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010

12. Maiorov, N. N. and V. A. Fetisov. “Research of operational processes passenger services in the marine passenger terminal using simulation.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 70–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-70-80.

14. Maiorov, N. N. and V. A. Fetisov. “Planning work of maritime passenger terminals in terms of intensity of cruise ships calls.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 3 (2019): 120–128. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-120-128.

15. Dobrovolskaya, A. A., N. N. Mayorov and M. R. Yazvenko. “Decision-making under uncertainty in forecasting the development of a sea passenger port based on the modeling of different priorities of ships.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy: Sbornik statey XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. V 3-kh chastyakh, Sankt-Peterburg, 29 maya — 02 2023 goda. Tom Chast' 3*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023: 107–112.

15. Maiorov, N. N. and M. R. Yazvenko. “Research of data generation options based on multi-scenario modelling for decision-making under uncertainty in the development of maritime passenger terminal.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 898–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-898-909.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Язвенко Максим Романович —
аспирант кафедры системного анализа
и логистики
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: YazvenkoM@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yazvenko Maksim Romanovich —
postgraduate of the system analysis
and logistics department
Saint-Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaia str.,
Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: YazvenkoM@guap.ru

*Статья поступила в редакцию 06 апреля 2025 г.
Received: Apr. 6, 2025.*